

Empfehlungen des Forschungsverbunds Erneuerbare Energien für die Forschungsförderung im Bereich Photovoltaik

November 2017

Mit dem Klimaabkommen von Paris hat sich die Weltgemeinschaft darauf verständigt, die Erderwärmung auf deutlich unter zwei Grad zu begrenzen. Dieses ambitionierte Ziel kann nur durch einen zügigen und konsequenten Ersatz fossiler Energieträger durch Erneuerbare Energien erreicht werden. Durch den Ausstieg aus der Kernenergie und durch die beschlossene massive Vermeidung der CO₂-Emissionen in den kommenden Jahrzehnten ist die Umstellung der deutschen Energieversorgung auf erneuerbare Energien zwingend.

Die Photovoltaik (PV) wird mittelfristig eine zentrale Säule des vollständig auf erneuerbaren Energien basierenden Energiesystems mit Versorgungsanteilen von etwa 30 % in Europa und 60 % in sonnenreichen Ländern.¹ Die Umstellung auf hohe PV-Anteile ist eine große Aufgabe, die gelingen kann, weil die weltweit wachsende PV-Forschung hoch dynamisch ist und große Fortschritte zu verzeichnen hat.

Forschung für erfolgreiche Produkte

Durch die Umsetzung von Forschungsergebnissen in der Industrieproduktion konnten die Kosten für PV weltweit nachhaltig gesenkt und der weltweite Ausbau dieser Technologie vorangetrieben werden. Dazu haben deutsche Forschungsinstitute und Firmen wesentlich beigetragen:

- Diamantdrahtsägen führen zu Materialeinsparungen bei der Siliziumwaferproduktion.²
- Aluminiumoxid ermöglicht bessere Oberflächenpassivierungen in der Silizium-PV.^{3,4}
- Laserprozesse ermöglichen verbesserte Zellenrückseiten⁵ und verbesserte Zellenvorderseiten.⁶
- In Folge werden in der Massenfertigung von Siliziumzellen mittlerweile Wirkungsgrade von über 22 % erreicht.⁷
- Innovationen in der Verschaltungstechnik von Siliziumzellen setzten die hohen Zellwirkungsgrade in Module mit Leistungen über 300 Watt um.⁸
- Innovationen in Anlagen- und Prozesstechnik bei der Dünnschichttechnologie erreichen eine deutlich höhere Produktivität.
- Neue Verfahren steigern die Modul- und Systemzuverlässigkeit und verbessern die Qualitätssicherung.
- Durch weitere Skalierungsschritte sowie kosteneffizienter Produktionstechnik in der Dünnschicht-PV erschließt die Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid-Dünnschicht-Technologie (CIGS) jetzt neue Marktpotenziale.⁹
- Fortschritte bei Tag-Nacht-Speichern erleichtern die Integration von PV in bestehende Systeme.¹⁰

Neue Impulse aus der Forschung

Die rasante technische Entwicklung der PV wird sich fortsetzen, so dass zukünftig noch mehr Strom mit noch weniger Material und daher kostengünstiger erzeugt werden kann. Dafür bereitet die derzeitige und die zukünftige Forschung den Boden. Jüngste Forschungsergebnisse zeigen unter starker Beteiligung deutscher Institute vielfältige und noch vor wenigen Jahren ungeahnte Optionen für neue und weiter verbesserte PV-Technologien:

- Neue ladungsträgerselektive Poly-Silizium oder heterojunction Beschichtungen von Siliziumzellen erlauben höhere Wirkungsgrade von 22 %¹¹ bei multi-kristallinem Silizium und 25% bei monokristallinem Silizium mit grundsätzlich produktionsstauglichen Herstellungsmethoden.^{12,13} Es gibt zahlreiche Materialsysteme, die selektive Beschichtungen erlauben. Angewandte Forschung muss die für die Fertigung geeignetste Technologie ermitteln.
- Neue Silizium-Wafer können ohne Sägen und mit viel weniger Materialverlust hergestellt werden.^{14,15,16} Forschungsbedarf besteht bei der Umsetzung dieser Technologie in die Pilotierung.
- Der Einsatz neuer funktionaler Komponenten wie z.B. Passivierungsschichten, Punktkontakte sowie neue Materialien und Verfahren eröffnet neue Potenziale in der Dünnschichtphotovoltaik bei der CIGS-Technologie. Die Weiterentwicklungen der CIGS Zelle demonstriert mit 22,6 % Zellwirkungsgrad ein hohes Wirkungsgradpotenzial.¹⁷
- Mit den Perowskiten gibt es seit wenigen Jahren eine neue Materialklasse, die in kürzester Zeit Wirkungsgrade von 22 % auf kleinen Zellen im Labor demonstrieren konnte.¹⁸ Es besteht die Aussicht, dass Perowskitzellen mit Siliziumzellen oder Dünnschichtzellen zu hocheffizienten Tandemsolarzellen und Tandemsolarmodulen kombiniert werden können.^{19,20,21,22} Für die Weiterentwicklung ist Materialforschung erforderlich.^{23,24,25}
- Silizium-basierte Mehrfachsolarzellen mit III-V-Top-Zellen erreichen Wirkungsgradrekorde von 33,3 %²⁶ mit monolithischen Aufbau und 35 % bei separater Zellkontaktierung.²⁷ Hier muss an kostengünstigen Abscheidetechniken für Verbindungshalbleiter geforscht werden.
- III-V basierte Mehrfachsolarzellen erreichen in Kombination mit der optischen Konzentratortechnologie die weltweit höchsten Wirkungsgrade von 46,1 %.²⁸ Entwicklungen zu verbesserte Materialien und Prozesse zielen darauf ab, die 50 % Wirkungsgradgrenze zu überschreiten.
- Fortschritte bei Heterostrukturen, organischer Photovoltaik und im Bereich neuer Materialien eröffnen neue Wirkungsgrad- und Kostensenkungspotenziale.^{29,30}
- Innovative Prozesstechnik wie z.B. Rolle-zu-Rolle Beschichtung mechanisch flexibler Solarmodule ermöglicht radikal andere Fertigungskonzepte zu potenziell sehr niedrigen Kosten.³¹
- Innovative Designs und Oberflächenkonzepte (Farben, Drucke) schaffen ästhetische und architektonisch flexibel einsetzbare Solarmodule für eine erhöhte Akzeptanz von PV in der Gebäudehülle.
- Produktentwicklungen für die Gebäudeintegration der CIGS-Module bereiten den Weg für energieeffiziente Gebäude.³²

Die PV-Industrie und insbesondere der Anlagenbau in Deutschland können diese und zukünftige Forschungsergebnisse mit den Chancen der fortschreitenden Digitalisierung (Industrie 4.0) kombinieren. Dies führt zur Entwicklung kostengünstigerer Produktionsprozesse und letztendlich zum Ausbau der Marktposition.

Weltweites Wachstum des PV-Marktes und der PV-Forschung

Im Jahr 2016 wuchs der Weltmarkt für PV-Module um rund 50% auf 71 GW³³ und hat sich damit seit 2011 mehr als vervierfacht. In einer kürzlich in „Science“ publizierten Studie erwarten Experten der „Global Alliance of Solar Energy Research Institutes“ (GA-SERI), dass der Weltmarkt für neue PV-Systeme angesichts der rasch gesunkenen Preise auf 500 bis 2.500 GW/a ansteigt.³⁴ Wir stehen also am Beginn eines weltweiten Marktaufschwungs der PV. Für dieses enorme Wachstum sind hohe Investitionen in neue PV-Fertigungen erforderlich. Der derzeit schnell wachsende Weltmarkt honoriert Innovationen, die Solarstrom noch günstiger und umweltfreundlicher machen. Mit hochwertigen und besonders umweltfreundlichen Produkten (Green Label), die aus hoch integrierten Fertigungen (Industrie 4.0) kommen, können deutsche und europäische Hersteller profitieren.

Mit dem Markt wachsen auch die Anforderungen denen die PV gewachsen sein muss. Die architektonische, bauliche und systemische Integration von PV wird stark an Bedeutung gewinnen, um immer größere Flächenpotenziale zu erschließen und den PV-Ausbau für die Bürger akzeptabel zu gestalten. Hierfür sind neue Konzepte notwendig, die eine übergreifende Kooperation unterschiedlicher Industrien und Hersteller aus den Bereichen Bauwesen und Energietechnik sowie eine verstärkte Verzahnung mit der Gesellschaft z.B. im Rahmen mit Quartiers-, Stadt- und Landschaftsplanningen erfordern.

Der wirtschaftlich optimierte Betrieb eines wachsenden Anlagenparks in Deutschland und der Welt verlangt zudem profundes Knowhow zur Qualitätsanalyse der einzelnen Komponenten, das für ein Gelingen der weltweiten Energiewende entwickelt werden muss.

Empfehlung des FVEE

Die in Deutschland bestehende gute Verzahnung von PV-Forschung und PV-Industrie ist eine sehr günstige Voraussetzung dafür, dass unser Land auch zukünftig wesentliche Beiträge zu der sehr dynamischen Technologieentwicklung leistet und davon wirtschaftlich profitiert.

Der FVEE empfiehlt, die PV-Forschung als langfristiges Investment zu betrachten und sich nicht an kurzfristigen Marktbewegungen zu orientieren. Auf lange Sicht sichert die PV-Forschung eine bezahlbare und umweltfreundliche Stromversorgung in Deutschland und in der Welt. Dafür ist eine nachhaltig intensive und breit angelegte öffentliche Forschungsförderung für die angewandte und für die grundlagenorientierte Erforschung und Weiterentwicklung der Photovoltaik erforderlich. Ein starker Heimatmarkt stützt die Innovationskraft heimischer Unternehmen.

Der Nutzen

Die Nutzen einer starken PV-Forschung in einem starken Heimatmarkt und in einem internationalen Wachstumsmarkt sind:

1. Spitzenstellung des deutschen Anlagenbaus erhalten:

Ein wesentlicher Schritt bei der Kommerzialisierung wissenschaftlicher Ergebnisse ist die Übertragung des Gelernten in Prototypen bis hin zur Serienreife. Für die führende Weltmarktstellung des deutschen Anlagenbaus waren bisher und sind zukünftig die Entwicklungen der Forschungsinstitute aus der anwendungsnahen Zusammenarbeit von entscheidender Bedeutung.

2. Geschlossenheit der Wertschöpfungskette sichern:

In Deutschland gibt es trotz der Konsolidierungsphase der letzten Jahre eine lebendige PV-Industrie mit derzeit ca. 32.000 Arbeitsplätzen in Deutschland,³⁵ deren Wettbewerbsfähigkeit von den Leistungen der deutschen PV-Forschung gestärkt wird. Dazu gehören neben wenigen Zellherstellern auch zahlreiche mittelgroße Modulhersteller, die mit insgesamt über 2 GW Produktionskapazität erfolgreiche Marktpositionen besetzen. Dazu kommen führende Anbieter für PV-Spezialmärkte. So gibt es eine leistungsfähige Branche deutscher Komponenten- (u. a. Wechselrichter) und Materialhersteller, deren Wettbewerbsfähigkeit ebenfalls maßgeblich auf Innovationen aus der Forschung beruht. Eine sich über die gesamte Wertschöpfungskette erstreckende Forschung sichert die Geschlossenheit derselben ab, was zum Vorteil aller Glieder der Kette ist. In einem deutschen Energiesystem mit 200 GW installierter PV-Kapazität müssen allein 8 GW/a ersetzt werden – ein großer Markt, von dem eine geschlossene Wertschöpfungskette in der Breite profitiert.

3. Start-ups den Boden bereiten:

Eine stabile Forschungslandschaft hilft Start-ups und mittelständischen Unternehmen, von dem

weltweiten PV-Wachstum zu profitieren. Die nachhaltige und dauerhafte Knowhow-Sicherung in Forschungsinstituten hat in der Vergangenheit neuen und bestehenden deutschen Firmen den Einstieg in die Wachstumsbranche Photovoltaik ermöglicht und wird dies auch in Zukunft tun. So reduziert Deutschland die Abhängigkeit von externem Knowhow. Die anspruchsvolle Systemintegration der fluktuierenden erneuerbaren Energien erfordert innovative Ideen und Geschäftsmodelle für unser zukünftiges Energiesystem und bietet somit Raum für Firmengründungen. Neue Installateurs- und Service-Dienstleister werden für den PV-Sektor benötigt, wovon auch nachgelagerte Industriezweige, z.B. in der Messtechnik, profitieren.

4. Stromgestehungskosten weiter senken:

Die PV-Forschungsförderung hat bisher dazu beigetragen, den Wirkungsgrad zu steigern und die PV-Stromgestehungskosten in Deutschland von ehemals über 50 ct/kWh je nach Anwendung auf 5 bis 12 ct/kWh zu senken. Die zukünftige Forschung wird weitere hohe Kostensenkungspotenziale erschließen und somit die Kosten der Energiewende in Deutschland und auf globaler Ebene weiter reduzieren.

Kontakt

FVEE ForschungsVerbund Erneuerbare Energien
Dr. Niklas Martin
030-288756571
Anna-Louisa-Karsch-Str. 2
10178 Berlin-Mitte
www.fvee.de
fvee@helmholtz-berlin.de

Referenzen

- ¹ C. Breyer, D. Bogdanov, A. Gulagi, A. Aghahosseini, L. S. N. S. Barbosa, O. Koskinen, M. Barasa, U. Caldera, S. Afanasyeva, M. Child, J. Farfan and P. Vainikka, *On the role of solar photovoltaics in global energy transition scenarios*, Progress in Photovoltaics: Research and Applications **25**, 727-745 (2017).
- ² A. Bidiville, K. Wasmer, R. Kraft, C. Ballif, *Diamond Wire-Sawn Silicon Wafers – from the Lab to the Cell Production*, in Proc. 24th EU-PVSEC, Hamburg, 2009, pp. 1400-1405.
- ³ J. Schmidt, B. Veith, and R. Brendel, *Effective surface passivation of crystalline silicon using ultrathin Al₂O₃ films and Al₂O₃/SiN_x stacks*, Phys. Status Solidi RRL **3**, 287-289 (2009).
- ⁴ P. Saint-Cast, J. Benick, D. Kania, L. Weiss, M. Hofmann, J. Rentsch, R. Preu, S.W. Glunz, *High-efficiency c-Si solar cells passivated with ALD and PECVD aluminum oxide*, IEEE Electron Device Lett. **31**, 695–697 (2010).
- ⁵ R. Preu, S.W. Glunz, S. Schäfer, R. Lüdemann, W. Wettling, W. Pfleging, *Laser ablation - a new low-cost approach for passivated rear contact formation in crystalline silicon solar cell technology*, Proc. 16th EC PVSEC, Glasgow, 2000, pp. 1181-1184.
- ⁶ A. Esturo-Bretón, T.A. Wagner, J.R. Köhler, J.H. Werner, *Laser doping for crystalline silicon solar cell emitters*, in: Proceedings of the 13th NREL Workshop on Crystalline Silicon Solar Cell Materials and Processes, NREL, Vail, Colorado, USA, 2003, pp. 186-189.
- ⁷ <https://www.photovoltaik.eu/Archiv/Meldungsarchiv/article-692610-110949/solarworld-praesentiert-zelle-mit-22-prozent-wirkungsgrad-.html>, zuletzt abgerufen am 13. Oktober 2017.
- ⁸ <https://www.pv-magazine.de/2016/05/18/solarworld-praesentiert-auf-der-intersolar-europe-bifaciale-solarstromanlagen-und-300-watt-hochleistungsmodul/>, zuletzt abgerufen am 13. Oktober 2017.
- ⁹ <https://www.pv-magazine.de/2017/05/30/manz-nimmt-cigs-grossauftraege-in-angriff/>, zuletzt abgerufen am 13. Oktober 2017.
- ¹⁰ <https://www.solarserver.de/solar-magazin/nachrichten/aktuelles/2017/kw37/absatzrekord-bei-sonnen.html>, zuletzt abgerufen am 13. Oktober 2017.

- ¹¹ J. Benick, R. Müller, F. Schindler, A. Richter, H. Hauser, F. Feldmann, P. Krenckel, S. Riepe, M.C. Schubert, M. Hermle, S.W. Glunz, *Approaching 22% efficiency with multicrystalline n-type silicon solar cells*, in Proc. of 33rd EU-PVSEC, Amsterdam, NL, 2017, in press
- ¹² F. Haase, F. Kiefer, S. Schäfer, C. Kruse, J. Krügener, R. Brendel, R. Peibst, *Interdigitated back contact solar cells with polycrystalline silicon on oxide passivating contacts for both polarities*, Japanese Journal of Applied Physics **56** (2017).
- ¹³ A. Richter, J. Benick, F. Feldmann, A. Fell, M. Hermle, S. W. Glunz, *n-Type Si solar cells with passivating electron contact: Identifying sources for efficiency limitations by wafer thickness and resistivity variation*, Solar Energy Materials and Solar Cells **173**, 96-105 (2017).
- ¹⁴ S. Janz, D. Amiri, E. Gust, S. Kühnhold-Pospischil, S. Riepe, F. Heinz, M. Drießen, *Origin and Impact of Crystallographic Defects in Epitaxially Grown Si Wafers*, in Proc. of 33rd EU-PVSEC, Amsterdam, NL, 2017, in press
- ¹⁵ S. Kajari-Schröder, C. Gemmel, Jan Hensen, and Rolf Brendel, *Millisecond spatially homogeneous carrier lifetimes from epitaxial silicon wafers grown on porous Silicon*, in Proc. 33rd EU-PVSEC, Amsterdam, NL, 2017, in press.
- ¹⁶ S. Schoenfelder, F. Kaule, S. Schindler, R. Lantzsch, K. Petter, C. Beyer, J. Richter, *Kerf-Less Wafering Using Polymer Split Method for Photovoltaic Solar Cells and Modules*, 33rd EU-PVSEC, Amsterdam, NL, 2017.
- ¹⁷ P. Jackson, R. Wuerz, D. Hariskos, E. Lotter, W. Witte and M. Powalla, *Effects of heavy alkali elements in Cu(In,Ga)Se₂ solar cells with efficiencies up to 22.6%*, physica status solidi (RRL) – Rapid Research Letters **10**, 583-586 (2016).
- ¹⁸ S. S. Shin, E. J. Yeom, W. S. Yang, S. Hur, M. G. Kim, J. Im, J. Seo, J. H. Noh, S. I. Seok, *Colloidally prepared La-doped BaSnO₃ electrodes for efficient, photostable perovskite solar cells*, Science **356**, 167–171 (2017).
- ¹⁹ Albrecht, S.; Rech, B., *Perovskitesolar cells: On top of commercial photovoltaics*. Nature Energy (2017), **2**, 16196
- ²⁰ S. Albrecht, M. Saliba, J. P. C. Baena, F. Lang, L. Kegelman, M. Mews, L. Steier, A. Abate, J. Rappich, L. Korte, R. Schlattmann, M. K. Nazeeruddin, A. Hagfeldt, M. Gratzel and B. Rech, *Monolithic perovskite/silicon-heterojunction tandem solar cells processed at low temperature*, Energ Environ Sci **9** (2016) 81
- ²¹ D. P. McMeekin, G. Sadoughi, W. Rehman, G. E. Eperon, M. Saliba, M. T. Horantner, A. Haghighirad, N. Sakai, L. Korte, B. Rech, M. B. Johnston, L. M. Herz and H. J. Snaith, *A mixed-cation lead mixed-halide perovskite absorber for tandem solar cells*, Science **351** (2016) 151
- ²² U.W. Paetzold, M. Jaysankar, R. Gehlhaar, E. Ahlswede, S. Paetel, W. Qiu, J. Bastos, L. Rakocevic, B.S. Richards, T. Aernouts, M. Powalla, J. Poortmans, *Scalable perovskite/CIGS thin-film solar module with power conversion efficiency of 17.8%*, J. Mater. Chem. A, **5**, 9897-9906 (2017)
- ²³ N. H. Nickel, F. Lang, V. V. Brus, O. Shargaieva, and J. Rappich, *Unraveling the light-induced degradation mechanisms of CH₃NH₃PbI₃ perovskite films*, Advanced Electronic Materials (2017).
- ²⁴ F. Lang, O. Shargaieva, V. Brus, H. C. Neitzert, J. Rappich, and N. Nickel, *Influence of Radiation on the Properties and the Stability of Hybrid Perovskites*, Advanced Materials (2017).
- ²⁵ <http://pubs.rsc.org/-/content/articlehtml/2017/ta/c7ta01651d>
- ²⁶ R. Cariou, J. Benick, P. Beutel, N. Razek, C. Flötgen, M. Hermle, D. Lackner, S.W. Glunz, A. W. Bett, M. Wimplinger, F. Dimroth, IEEE JPV **7** (2017).
- ²⁷ M. Rienäcker, S. Kajari-Schröder, R. Niepelt, R. Brendel, R. Peibst, E. Warren, M. Schnabel, P. Stradins, A. Tamboli, *Maximum Power Extraction Enabled by Monolithic Tandems Using Interdigitated Back Contact Bottom Cells with Three Terminals*, 33rd EU-PVSEC, Amsterdam, NL, 2017.
- ²⁸ F. Dimroth, T.N. D. Tibbits, M. Niemeyer, F. Predan, P. Beutel, C. Karcher, E. Oliva, G. Siefer, D. Lackner, P. Fuß-Kailuweit, A.W. Bett, R. Krause, C. Drazek, E. Guiot, J. Wasselin, A. Tauzin, T. Signamarcheix, IEEE JPV **6**, (2016).
- ²⁹ D. Zielke, C. Niehaves, W. Lövenich, A. Elschner, M. Hörteis, J. Schmidt, *Organic-silicon solar cells exceeding 20% Efficiency*, Energy Procedia **77**, 331-339 (2015).
- ³⁰ J. Czolk, D. Landerer, M. Koppitz, D. Nass, A. Colmann, *Highly Efficient, Mechanically Flexible, Semi-transparent Organic Solar Cells Doctor Bladed from Non-halogenated Solvents*, Adv. Mater. Technologies **1**, 1600184 (2016)
- ³¹ L. Lucera, F. Machui, P. Kubis, H.-J. Egelhaaf, C. J. Brabec, *Highly efficient, large area, roll coated flexible and rigid solar modules: Design rules and realization*, 43rd IEEE PVSC, Portland, OR, 2016.
- ³² <https://www.zsw-bw.de/presse/aktuelles/detailansicht/news/detail/News/duennschichtphotovoltaik-an-der-fassade-den-weg-in-den-markt-ebnen.html>
- ³³ http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2017.pdf , S. 24 zuletzt abgerufen am 13. April 2017
- ³⁴ N.M. Haegel et al., *Terawatt-scale photovoltaics: Trajectories and challenges*, Science **356** (6334), 141 (2017)
- ³⁵ https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/S-T/bruttobeschaeftigung-erneuerbare-energien-monitoringbericht-2015.pdf?__blob=publicationFile&v=11, S. 8